УДК 621.311.161

ВЕРОЯТНОСТНАЯ НАСТРОЙКА СТУПЕНЧАТЫХ ТОКОВЫХ РЕЛЕЙНЫХ ЗАЩИТ

А.В. Шмойлов

Томский политехнический университет
E-mail: shm_av@rambler.ru

Представлены существующий экспертно-руководящий и предлагаемый вероятностный метод гарантированной настройки каналов релейной защиты и автоматики, позволяющий при каждой принятой уставке вычислить величину технического эффекта, также обеспечить оптимальную настройку уставки каждого канала, исходя из максимального технического эффекта.

Вероятностная настройка (определение уставок) устройств и систем контроля, к которым относится и релейная защита (РЗ), состоит в том, чтобы выставить на регулировочных панелях или цифровых табло аппаратуры такие значения уставок, с которыми данное средство контроля объективно выполняло бы свою функцию наилучшим образом, т.е. с наибольшим эффектом или с наименьшими техническими потерями.

Существующий в настоящее время экспертно-руководящий метод (ЭРМ) [1, 2] позволяет настроить аппаратуру (определить уставки) РЗ. Однако данная настройка в ряде случаев является неоптимальной и в определенной степени случайной. Последнее имеет место несмотря на то, что по требованиям метода предписывается обязательная гарантирующая процедура проверки чувствительности, которая при превышении фактическим коэффициентом чувствительности минимально-возможного экспертного значения рассматривается как утверждение правильного определения уставок. Однако анализ показал, что рекомендуемые экспертно-руководящим методом действия как при выборе уставок, так и при проверке чувствительности принципиально не могут быть в полной мере правомерными. Действительно, выполнение самых ответственных действий: определение максимальных токов при выборе уставок и минимальных – при проверке чувствительности каналов РЗ ЭРМ возлагает не на собственный разработанный конкретный механизм (алгоритм) достижения экстремальных токов, который как таковой в детерминированном виде принципиально не может быть создан, а на субъективное разумение и интуицию конкретных расчетчиков или проектировщиков, которые бесперспективно каждый на свой страх и риск должны перебирать практически бесконечное множество вариантов формирования или мобилизации экстремумов, так и не достигнув объективного удовлетворения. Бесконечное множество вариантов обусловлено случайным характером (дисперсностью) их параметров: значений электрических величин режимов, количеством коммутационных сочетаний, показателей среды и др.

Принципиальным недостатком ЭРМ как и любого экспертного метода является также отсутствие объективного количественного критерия ограничений рекомендуемых значений коэффициентов отстройки и чувствительности. Это обусловливает неизвестную, а, более точно, случайную приспособленность интересующего средства контроля к характеристикам автоматизируемого объекта и, как следствие, недостаточно эффективную работу указанного средства контроля.

Объективным критерием настройки и работы каждого конкретного средства контроля является достигаемый технический или экономический эффект, а оптимальная настройка имеет место при максимальных их значениях. При этом должно быть соблюдено условие приемлемости устройства или системы контроля для автоматизируемого объекта энергосистемы, т.е. эффекты должны быть положительными. В данной статье рассматриваются вопросы настройки и работы средств релейной защиты и автоматики (РЗА) энергосистем, в частности, ступенчатых токовых релейных защит нулевой последовательности (СТЗНП) на основе технического эффекта. Впервые ставится также задача оптимальной настройки РЗА.

Все это оказалось возможным благодаря разработке ряда новых вероятностных методов, алгоритмов для научно-исследовательских задач разных отраслей, в том числе электроэнергетики; критериев технической эффективности для разных устройств и систем контроля и, в частности, каналов РЗА; применению возможностей использования электроэнергетических вычислительных расчетных комплексов (ВРК) для практической реализации названных методов и алгоритмов. Так, разработан новый инженерный вероятностно-статистический метод селекции границ интервалов исходных и выходных данных (СГИД) [3], который позволяет получать полные вероятностные характеристики или законы распределения вероятностей (ЗРВ) неслучайных функций (НФ) от случайных аргументов (СА) по известным или заблаговременно найденным (принятым) ЗРВ СА или исходных данных. Также разработан [4] комплекс алгоритмов определения технической эффективности любого канала систем контроля, в том числе РЗА, который позволяет просто найти полный эффект функционирования канала и потери как вероятности отказов срабатывания, ложных и излишних действий и сопоставить их при одних и тех же условиях. Далее приводится краткое описание по-

строения и функционирования ступенчатых токовых релейных защит при использовании токов нулевой последовательности (СТЗНП), а также рассматриваются алгоритмы, последовательности действий, процедуры их настройки.

СТЗНП широко используются в российской электроэнергетике для обнаружения и подавления таких возмущений как короткие замыкания (КЗ) на землю на линиях, трансформаторах и автотрансформаторах путем отключения от сети поврежденного элемента. Ступенчатый принцип построения позволяет реализовать защиту элемента с помощью совокупности независимо действующих каналов или ступеней, выполняющих разные функции.

Обычно первая ступень самая грубая и быстродействующая выполняет функцию наиболее быстрого предотвращения протекания токов при КЗ на головных участках защищаемого объекта. В случае СТЗНП линии комплект релейной защиты (РЗ) I ступени на каждом из концов линии отключает свой конец от сети без выдержки времени при КЗ на головной части линии относительно каждого конца. Головная часть распространяется в направлении противоположных концов, но не доходит до них, по крайней мере, на величину запаса, обусловленную погрешностями расчетов и аппаратуры. Фактическая величина запаса, рекомендуемая в ЭРМ при определении уставки по параметру (току) реагирования в зависимости от коммутационного состояния сети, режима источников и видов КЗ меняется. Количественные значения параметра реагирования при этом также изменяются, и это обусловливает изменение зоны действия I ступени.

Вторые и в ряде случаев третьи более чувствительные по параметру реагирования ступени предназначены для более надежной защиты автоматизируемых силовых элементов, работающих в разных условиях, включая самые неблагоприятные коммутационные состояния сети и режимы источников. В случае применения данных ступеней для линии в функцию последних должна быть включена также надежная фиксация КЗ на противоположных концах. Это в ЭРМ обеспечивается назначением запаса чувствительности по параметру реагирования при КЗ на противоположных концах, что обусловливает распространение зоны действия II (III) ступеней на предыдущие элементы в направлении действия ступеней и требует специальных мероприятий, чтобы обеспечить селективное отключение КЗ на предыдущих элементах, т.е. заблокировать действие названных ступеней при этих КЗ. Мероприятия реализуются путем согласования уставок II (III) ступеней защищаемой линии с уставками I (II) ступеней предыдущих элементов соответственно как по параметру реагирования, так и по времени. Необходимо, чтобы II (III) ступени защищаемой линии были менее чувствительными и быстродействующими относительно I и II ступеней предыдущих элементов. ЭРМ рекомендует выполнять указанные согласования при КЗ в совместных областях действия ступеней защищаемой линии и предыдущих элементов, также согласовывать со ступенями СТЗНП на средней стороне трансформаторов (автотрансформаторов), отстраивать от токов при КЗ за предыдущими элементами, обрывах фаз на защищаемой и предыдущих линиях, небалансах нулевой последовательности при асинхронном режиме по линии и при трехфазных КЗ на выводах низшей стороны трансформаторов (автотрансформаторов). С каждым согласованием или отстройкой по параметру реагирования уставки II (III-х) ступеней либо остаются максимальными по предыдущим согласованиям либо становятся еще большими.

Наиболее чувствительные III или IV ступени, резервирующие каналы РЗ I–II или I–III основных ступеней защищаемой линии и предыдущих элементов, имеют, как правило, большие выдержки времени. Поэтому ЭРМ рекомендует отстраивать резервирующие ступени от небаланса нулевой последовательности только в максимальном рабочем режиме, а все остальные вышеперечисленные отстройки от значений параметра реагирования в различных переходных процессах не требуются. При больших временах действия ступеней параметр реагирования успевает уменьшиться до величин, не превышающих уставку, и ступень в целом не будет срабатывать.

Вероятностная настройка состоит из ряда этапов. Сначала необходимо определить полный эффект повреждения (возмущения), который должна обнаружить каждая интересующая ступень. Полный эффект повреждения – это заданные виды КЗ на заданных силовых объектах, которые должны быть не только обнаружены, но и отключены, т.е. ликвидированы. Так как КЗ являются случайными событиями, то количественно полный эффект повреждения может быть выражен в виде вероятности состояния обнаружения и отключения КЗ на защищаемых объектах. Защищаемым объектом основных I–II или I–III ступеней СТЗНП линии является сама линия либо ее часть. Для резервирующих III или IV ступеней защищаемый объект включает помимо самой линии также все предыдущие элементы (линии, трансформаторы и автотрансформаторы, подключенные к противоположным концам защищаемой линии). Таким образом, полные эффекты повреждения ступеней СТЗНП являются вероятностями состояний обнаружения и отключения или вероятности состояния наличия повреждения на защищаемом объекте, которые можно обозначить: $p(\mathrm{A}^{\mathrm{I}}_{№})$ для первой, $p(\mathrm{A}^{\mathrm{II}}_{№})$ – второй, $p(\mathrm{A}^{\mathrm{III}}_{№})$ – третьей, $p(\mathrm{A}^{\mathrm{IV}}_{№})+\sum_{n+1}^{n_{\text{п}}} p(\mathrm{A}^{\mathrm{IV}}_{\text{п}})$ – четвертой ступеней, где в верхнем индексе римскими цифрами обозначены номера ступеней, а в нижнем даны обозначения (номера) защит: № для защищаемой линии, п для предыдущих элементов, $n_{\text{п}}$ в верхнем пределе суммы обозначает количество предыдущих элементов.

Установившиеся финитные вероятности состояний наличия КЗ на защищаемой линии определяются в соответствии с теорией дискретных стационарных процессов произведением параметров пото-

ков ω КЗ на защищаемых или предыдущих объектах на среднюю продолжительность $m(T)$ соответствующего состояния, в данном случае обнаружения и отключения повреждения или полное время работы ступени. Следовательно, величины этих вероятностей будут иметь следующие выражения:

- для первой, второй и третьей основных ступеней соответственно

$$p(\mathrm{A}_{№}^{\mathrm{I}})=\omega_{\text{л}}^{(1,4)}m(T_{№}^{\mathrm{I}}),\;\; p(\mathrm{A}_{№}^{\mathrm{II}})=\omega_{\text{л}}^{(1,4)}m(T_{№}^{\mathrm{II}}),$$
$$p(\mathrm{A}_{№}^{\mathrm{III}})=\omega_{\text{л}}^{(1,4)}m(T_{№}^{\mathrm{III}}),$$

где $\omega_{\text{л}}^{(1,4)}=\omega_{\text{л}}^{\text{у}}\dfrac{l_{\text{л}}}{100}[p(\mathrm{S}1)+p(\mathrm{S}4)]$ – параметр потока одно- S1 и двухфазных S4 КЗ на землю на линии, цифры (1,4) в верхнем индексе у параметра потока $\omega_{\text{л}}^{(1,4)}$ дополнительно также обозначают одно- и двухфазные КЗ на землю, $\omega_{\text{л}}^{\text{у}}$ – удельный параметр потока повреждений всех видов на линии, приходящийся на 100 км ее длины, справочная величина в зависимости от класса напряжения, $l_{\text{л}}$ – полная длина всех участков линии, $p(S1)$=0,7 и $p(S4)$=0,15 – усредненные значения вероятностей однофазных и двухфазных КЗ на землю в высоковольтной сети;

- для четвертой резервирующей ступени

$$p(\mathrm{A}_{№}^{\mathrm{IV}})+\sum_{\text{п}=1}^{n_{\text{п}}}p(\mathrm{A}_{\text{п}}^{\mathrm{IV}})=\omega_{\text{л}}^{(1,4)}m(T_{№}^{\mathrm{IV}})+\sum_{\text{п}=1}^{n_{\text{п}}}\omega_{\text{п}}^{(1,4)}m(T_{\text{п}}^{\mathrm{IV}}),$$

где $\omega_{\text{п}}^{(1,4)}=\omega_{\text{п}}^{\text{у}}\dfrac{l_{\text{п}}}{100}[p(\mathrm{S}1)+p(\mathrm{S}4)]$ – параметр потока одно- S1 и двухфазных S4 КЗ на землю для случая предыдущего элемента линии, $\omega_{\text{п}}^{\text{у}}$ – удельный параметр потока повреждений всех видов на п-й предыдущей линии, приходящийся на 100 км ее длины, справочная величина в зависимости от класса напряжения, $l_{\text{п}}$ – полная длина всех участков предыдущей линии, $\omega_{\text{п}}^{(1,4)}=\omega_{\text{п}}[p(S1)+p(S4)]$ – параметр потока одно- S1 и двухфазных S4 КЗ на землю для случая сосредоточенного предыдущего элемента, например, трансформатора, $\omega_{\text{п}}$ – параметр потока повреждений всех видов предыдущего элемента, например, трансформатора, справочная величина в зависимости от класса напряжения.

Следует заметить, что составляющие приведенных вероятностей: параметры потоков и средние продолжительности являются естественно независимыми и полными характеристиками в условиях их наблюдения. Это позволяет выраженные через них вероятности состояний рассматривать безусловными относительно других вероятностей, которые наряду с наиболее полными и обобщенными условиями наблюдения могут быть определены также при разных ограничениях или дополнительных условиях, например, в условиях наличия КЗ, рабочего, неполнофазного или асинхронного режима.

Метод СГИД позволяет находить по ЗРВ СА как в целом ЗРВ неслучайных функций (НФ), так и параметры заданных на основании определенных отображений (многомерности, линейности НФ, независимости СА) некоторых видов ЗРВ. При этом он выполняет весьма просто и наглядно свою функцию в условиях разных ограничений. Это имеет место потому, что ЗРВ как в виде функций распределения вероятностей (ФРВ), так и особенно в виде плотностей распределения вероятностей (ПРВ) в условиях ограничений всегда имеют менее сложную конфигурацию. Следовательно, для условных ФРВ и ПРВ интересующей НФ можно более просто найти и выбрать виды или назначить области значений ФРВ или ПРВ, в которых по методу СГИД можно получить значения, в наименьшей степени отличающихся от истинных.

Практически вследствие многомерности и линейности НФ базовых электрических величин (токов в ветвях, рабочих и остаточных напряжений в узлах), которые зависят от заданных узловых токов, в установившихся, ненормальных режимах и при КЗ можно принять нормальные ЗРВ. Тогда методом СГИД должны быть найдены только два параметра нормальных ЗРВ: математическое ожидание (МО) $m(I_{0№})$ и среднеквадратическое отклонение (СКО) $\sigma(I_{0№})$ или квадрат последнего – дисперсия. Это может быть выполнено по формулам, например, для тока нулевой последовательности, протекающего через канал РЗ №:

$$\sigma(I_{0№})=\frac{i_{0№p_1}-i_{0№p_2}}{\Phi^{-1}(p_1-0,5)-\Phi^{-1}(p_2-0,5)},$$
$$m(I_{0№})=i_{0№p_1}-\sigma(I_{0№})\Phi^{-1}(p_1-0,5),$$

где $i_{0№p_1}$, $i_{0№p_2}$ – квантили порядков p_1 и p_2 токов нулевой последовательности (индекс 0) через канал (индекс №) защиты или ступени, полученные как значения нарастающей НФ при задании исходных данных или СА в виде квантилей таких же порядков, а при убывающей НФ – как квантили порядков $1-p_1$ и $1-p_2$, причем нарастающий характер НФ устанавливается по одинаковому знаку разностей квантилей выходных данных или результатов НФ $i_{0№p_1}-i_{0№p_2}$ и соответствующих порядков p_1-p_2 исходных данных или СА как квантилей; $\Phi^{-1}(p_1-0,5)$, $\Phi^{-1}(p_2-0,5)$ – обратные функции Лапласа при нарастающей НФ, а при убывающей НФ указанные обратные функции Лапласа будут иметь вид $\Phi^{-1}(0,5-p_1)$, $\Phi^{-1}(0,5-p_2)$.

Необходимо подчеркнуть, что полученные по методу СГИД ЗРВ должны представлять в целом автоматизируемые объекты по ряду факторов: по их физическому пространству, по коммутационным состояниям сети, по режимам источников, по видам повреждений, т.е. ЗРВ должны быть усреднены по всем указанным факторам. Однако данная огромная рутинная работа может быть проделана только с использованием специально разработанных вычислительных программ. Путем визуального анализа указанных факторов и многократных числовых расчетов (экспериментов) на энергетических вычислительных расчетных комплексах (ВРК) можно хотя и приближенно, но достаточно надеж-

но определить экстремально-наблюдаемые значения любой электрической величины как в установившихся, так и в псевдостационарных режимах. Полагая нормальное распределение вероятностей каждой такой величины, просто и легко по методу СГИД найти параметры МО и СКО усредненного по всем факторам ее нормального ЗРВ. Учитывая линейную взаимосвязь токов в ветвях и напряжений в узлах сети, можно экстремально наблюдаемые значения данных электрических величин получать при реализации на ВРК режимов с одной и той же базой данных, т.е. фактически с помощью обычных детерминированных штатных расчетов режимов при одной базе, но при разных условиях, наложенных на нее, на ВРК определять специализированные (обусловленные вероятностным содержанием) значения электрических величин, через которые можно получить полные вероятностные характеристики. С учетом отмеченных моментов, автор разработал и использовал практические весьма быстродействующие алгоритмы определения параметров усредненных по всем факторам ЗРВ.

Полученные параметры нормального ЗРВ являются условными и определенные с помощью этих ЗРВ составляющие технического эффекта или технической эффективности, например, вероятности отказов срабатывания, ложных или излишних действий будут также условными и поэтому их непосредственное использование в выражениях технического эффекта и технической эффективности неправомерно. Необходимо приведение всех указанных составляющих (вероятностей) технического эффекта или технической эффективности к одним и тем же условиям наблюдения. Это приведение осуществляется весьма просто путем умножения условных вероятностей $p(П^{с}_{0№}/У^{с}_{0№})$ разных потерь $П^{с}_{0№}$ для каждой ступени (верхний индекс с) на безусловные вероятности $p(У^{с}_{0№})$ соответствующих условий или состояний $У^{с}_{0№}$. Последние всегда могут быть найдены по имеющейся отчетной статистике путем перемножения параметра потока реализации интересующих условий $\omega_у$ на соответствующую среднюю продолжительность $m(T^{с}_{№})$ функционирования канала РЗ (ступени) с комплекта № или по выражению $p(У^{с}_{0№})=\omega_у m(T^{с}_{№})$. Параметр потока разных интересующих условий $\omega_у$ в ряде случаев может быть найден по заданной в отчетной статистике – средней $m(T_у)$ периодичности $T_у$ между возникновениями интересующих условий в предположении экспоненциального распределения вероятностей названной периодичности, т.е. $\omega_у=1/m(T_у)$. Так, с помощью средней периодичности между событиями могут быть определены параметры потоков асинхронного режима, потери устойчивости, неполнофазного режима на предыдущих линиях вследствие организации на них пофазного ремонта и др.

Что касается вероятности $p(Э^{с}_{№})$ нормального эксплуатационного состояния $Э^{с}_{№}$, при котором могут возникнуть ложные действия, то данная вероятность вследствие малости вероятностей других обсуждаемых состояний близка к единице, соотношение между вероятностью $p(Э^{с}_{№})$ и вероятностями других состояний для защит разных объектов $10^{4}...10^{11}$.

На основании изложенного технический эффект разных ступеней может быть представлен в следующих видах.

Для первой ступени потери обусловлены отказами срабатывания $О^{I}_{№}$, ложными действиями в эксплуатационных режимах $Л^{I}_{№}$ и ложными действиями в неполнофазных режимах $Л^{I}_{нпф№}$ при работе однофазного автоматического повторного включения (ОАПВ):

- через безусловные вероятности потерь

$$E^{I}_{№} = p(А^{I}_{№}) - p(О^{I}_{№}) - к_{п}^{о\text{-}л}\, p(Л^{I}_{№}) - к_{п}^{о\text{-}лнпф}\, p(Л^{I}_{нпф№}),$$

- с использованием условных вероятностй

$$E^{I}_{№} = p(А^{I}_{№}) - p(О^{I}_{№}/А^{I}_{№})\,p(А^{I}_{№}) -$$
$$-к_{п}^{о\text{-}л}\, p(Л^{I}_{№}/Э_{№})\,p(Э_{№}) -$$
$$-к_{п}^{о\text{-}лнпф}\, p(Л^{I}_{нпф№}/Н^{I}_{№})\,p(Н^{I}_{№}),$$

где $к_{п}^{о\text{-}л}$, $к_{п}^{о\text{-}лнпф}$ – удельные веса для приведения случаев ложных действий в рабочих и неполнофазных режимах к отказам срабатывания,

Удельный вес или коэффициент приведения $к_{п}^{о\text{-}л}$ выбирается по двум соображениям:

- субъективной оценки практического эффекта разового ложного действия $p_л$ относительно разового отказа срабатывания $p_о$, очевидно отношение $p_л/p_о$ должно быть меньше единицы, например, $p_л/p_о=0,1$;
- объективной оценки по соотношению вероятностей состояний $p(А^{I}_{№})/p(Э^{I}_{№})$ наличия КЗ в ОД I ступени $p(А^{I}_{№})$ и рабочего эксплуатационного режима $p(Э^{I}_{№})$ линии, в котором возникают ложные действия, данное соотношение определяется ничтожно малой вероятностью $p(А^{I}_{№})$ и вероятностью $p(Э^{I}_{№})$, которая практически равна единице.

Следовательно, коэффициент приведения $к_{п}^{о\text{-}л}$ определяется произведением обсуждаемых соотношений, т.е. $к_{п}^{о\text{-}л}=(p_л/p_о)[p(А^{I}_{№})/p(Э^{I}_{№})]$.

Удельный вес или коэффициент приведения $к_{п}^{о\text{-}лнпф}$ ложных действий при неполнофазных режимах в части объективной оценки по соотношению вероятностей состояний $p(А^{I}_{№})/p(Н^{I}_{№})$ наличия КЗ в ОД I ступени $p(А^{I}_{№})$ и неполнофазных режимов $p(Н^{I}_{№})$ практически не отличается или в соизмеримой степени имеет названное отличие. В части же субъективной оценки практического эффекта разового ложного действия $p_{лнпф}$ относительно разового отказа срабатывания $p_о$, отношение $p_{лнпф}/p_о$ количественно должно быть аналогичным отношению $p_л/p_о$. Поэтому коэффициент приведения   определится произведением названных соотношений, т.е. $к_{п}^{о\text{-}лнпф}=(p_{лнпф}/p_о)[p(А^{I}_{№})/p(Н^{I}_{№})]$.

Для второй (аналогично третьей) ступени потери обусловлены отказами срабатывания $О^{II}_{№}$, ложными действиями в эксплуатационных режимах $Л^{II}_{№}$ и ложными действиями в неполнофазных режимах на защищаемой линии при работе ОАПВ $Л^{II}_{нпф№}$,

определяемые как и для первой ступени, но также дополнительно ложными действиями в неполнофазных режимах на предыдущих линиях при работе ОАПВ $Л^{IIнпф}_{№}$ и пофазных ремонтах $Л^{IIнпфпп}_{№}$ на них, ложными действиями при асинхронных режимах на защищаемой линии $Л^{IIап}_{№}$, излишних действий $И^{II}_{№п}$ при КЗ на предыдущих элементах. Выражение технического эффекта через безусловные вероятности при этом имеет вид:

$$E^{II}_{№} = p(A^{II}_{№}) - p(O^{II}_{№}) - к^{о\text{-}л}_{п} p(Л^{II}_{№}) -$$
$$-к^{о\text{-}лнпф}_{п} \{p(Л^{IIнпф}_{№}) + \sum_{п=1}^{n_{лп}} [p(Л^{IIнпфп}_{№}) +$$
$$+p(Л^{IIнпфпп}_{№})]\} - p(Л^{IIар}_{№}) - к^{о\text{-}и}_{п} \sum_{п=1}^{n_{п}} p(И^{II}_{№п}),$$

где $p(И^{II}_{№п}) = \frac{1}{2} p(И^{II\bar{О}п}_{№п}) + p(И^{IIОп}_{№п})$, $n_{п}$ – число предыдущих элементов, $n_{лп}$ – число предыдущих линий, $к^{о\text{-}и}_{п}$ – коэффициент приведения излишних действий к отказам срабатывания.

Составляющая излишних действий $\frac{1}{2} p(И^{II\bar{О}п}_{№п})$ – половина вероятности излишних действий II ступени РЗ защищаемой линии вследствие отказа $\bar{Б}^{II}_{№}$ ее блокирования при КЗ на п-м предыдущем элементе и при отсутствии отказа РЗ последнего – сформирована, исходя из равной вероятности срабатывания как II ступени защищаемой линии, так и быстродействующей защиты п-го предыдущего элемента при КЗ на последнем. Другая составляющая излишних действий $p(И^{IIОп}_{№п})$ – вероятность излишних действий II ступени РЗ защищаемой линии вследствие отказа ее блокирования при КЗ на п-м предыдущем элементе и при отказе защиты последнего – учитывает непосредственно необходимость резервирования при отказе защиты на п-м предыдущем элементе.

Выражение технического эффекта через условные вероятности представляет собой с учетом анализа по упрощению составляющих по излишним действиям следующее:

$$E^{II}_{№} = p(A^{II}_{№}) - p(O^{II}_{№}/A^{II}_{№}) p(A^{II}_{№}) -$$
$$-к^{о\text{-}л}_{п} p(Л^{II}_{№}/Э^{II}_{№}) p(Э^{II}_{№}) -$$
$$-к^{о\text{-}лнпф}_{п} \{p(Л^{IIнпф}_{№}/H^{II}_{№}) p(H^{II}_{№}) +$$
$$+\sum_{п=1}^{n_{лп}} [p(Л^{IIнпфп}_{№}/H^{II}_{п}) p(H^{II}_{п}) +$$
$$+p(Л^{IIнпфпп}_{№}/H^{II}_{пп}) p(H^{II}_{пп})] - p(Л^{IIар}_{№}/AP_{№}) p(AP_{№}) -$$
$$-p(\bar{Б}^{II}_{№}) \sum_{п=1}^{n_{п}} [\frac{1}{2} p(A^{II}_{№п}/A^{I}_{п}) p(A^{I}_{п}) + p(O^{I}_{п\text{-}II}/A^{I}_{п}) p(A^{I}_{п})].$$

Аналогичные выражения эффектов могут быть записаны для резервирующих ступеней линии, например, четвертой.

Расчеты технической эффективности (отношение разности полного эффекта и потерь к полному эффекту) для первых и вторых ступеней СТЗНП линий 500 кВ Тюменской энергосистемы для настроенных по ЭРМ уставок давали значения от отрицательных чисел до 0,999. Изменение уставок приводит к изменению потерь и эффективности. Можно получить уставки, соответствующие максимальной эффективности, т.е. оптимальные. Последняя может быть и отрицательной. Полученные сведения подтверждают вывод о том, что настройка РЗА по ЭРМ фактически случайна, а потому необъективна. Оптимальная настройка РЗА при малой эффективности по обсуждаемому вероятностному методу является однозначным критерием неприемлемости применяемой аппаратуры. Обсуждаемые результаты актуальны в связи с участившимися системными авариями в энергосистемах. Вполне правомерна постановка задача разработки методик оптимальной настройки разных устройств и систем РЗА на основе анализа их технического эффекта и технической эффективности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федосеев А.М. Релейная защита электроэнергетических систем: Релейная защита в электрических сетях. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 528 с.
2. Рубинчик В.А. Резервирование отключения коротких замыканий в электрических сетях. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 120 с.
3. Shmoilov A.V. Probability technologies in electric power industry // Proc. 6th Russian-Korean Intern. Symp. on Science and Technology KORUS-2002. – Novosibirsk, 2002. – V. 2. – P. 421–424.
4. Shmoilov A.V. Probability Setup and Technical Efficiency of Relay Protection and Automatics // Proc. 9th Russian-Korean Intern. Symp. on Science and Technology KORUS-2005. – Novosibirsk, 2005. – P. 382–386.